



Nowa technologia infiltracji (impregnacji) porowatych struktur układów tribologicznych z cząstkami smarów stałych i powłok otrzymywanych technologią metalurgii proszków

New technology of infiltration (impregnation) of the porous structures of tribological systems with HTSL particles and coating by PM technology

(1) Hanna Wiśniewska-Weinert, (2) Marcin Lijewski*, (3) Joanna Sulej-Chojnacka, (4) Volf Leshchynsky
Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 29.09.2015
Data recenzji: 16.11.2015
Data akceptacji: 22.03.2016

Wkład autorów

- (1) Koncepcja pracy, metodyki prac naukowo-badawczych, analiza oraz interpretacja wyników i wniosków
- (2) Badania, analiza oraz interpretacja wyników i wnioski z badań, metodyka badań
- (3) Koncepcja i założenia pracy, metodyka badań oraz badań i interpretacji wyników
- (4) Założenia pracy i metodyki badań, analiza i interpretacja wyników i wniosków

Streszczenie

W skali światowej ok. 30–50% energii produkowanej corocznie pochłaniają opory tarcia. Ważnymi zjawiskami towarzyszącymi tarcia, o dużym znaczeniu technicznym, są procesy zużywania materiałów trących oraz smarowanie. Zużycie tribologiczne jest rodzajem zniszczenia powierzchni spowodowanego procesami tarcia, w którym następuje zmiana struktury i fizycznych własności warstw wierzchnich obszarów styków, jak również lokalne ubytki masy. Intensywność zużycia tribologicznego zależy od odporności na ścieranie obszarów tarcia warstw wierzchnich oraz od rodzaju oddziaływania. W celu wydłużenia czasu użytkowania części maszyn cząstki smarów stałych są zwykle dodawane do proszków metali przed procesem spiekania. Jednak skuteczność działania tych materiałów jako smarów jest bardzo niska ze względu na degradację termiczną podczas spiekania detali proszkowych. W takim przypadku technika ciśnieniowej impregnacji spieczonych części proszkowych wydaje się być dobrym rozwiązaniem. Dlatego tak ważnym elementem jest dobranie odpowiedniego smarowania oraz modyfikacja warstwy wierzchniej. W pracy przedstawiono wyniki badań nad nową technologią impregnacji ciśnieniowej. Metoda ta stosowana jest do modyfikacji tulei ślizgowych. Istotnym elementem nowo opracowanej technologii są parametry prowadzonego procesu oraz właściwości fizyczne (rodzaj, wielkość, struktura, geometria) impregnowanych cząstek smaru stałego. Modyfikacja warstwy wierzchniej za pomocą procesu impregnacji ciśnieniowej współpracujących układów tribologicznych wpływa na wydłużenie czasu pracy określonych par trących. Celem pracy było scharakteryzowanie technologii impregnacji ciśnieniowej, zjawisk zachodzących podczas infiltracji oraz określenie parametrów technologii impregnacji ciśnieniowej.

Słowa kluczowe: impregnacja ciśnieniowa, metalurgia proszków, smary stałe, struktura porowata, tribologia, nanocząstka

Article info

Received: 29.09.2015
Reviewed: 16.11.2015
Accepted: 22.03.2016

Authors' contribution

- (1) Concept of work, methodology of the research, analysis and interpretation of results and conclusions

Abstract

On a global scale approx. 30–50% of energy generated every year is absorbed by friction resistance. Important phenomena, which accompany friction and have great technical importance, include processes of wear of friction materials and lubrication. Tribological wear is a type of surface destruction caused by friction processes, which result in change of structure and physical properties of surface area of contacts as well as local weight losses. Intensity of tribological wear depends on resistance of surface layer friction areas to abrasion as well as type of influence exerted. In order to extend the period of use of machine parts, HTSL particles are usually added to metal powders before sintering processes.

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; Fax: +48 61 657 07 21; e-mail: marcin.lijewski@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; Fax: +48 61 657 07 21; e-mail: marcin.lijewski@inop.poznan.pl

- (2) *Research, analysis and interpretation of the results and conclusions of the study, research methodology*
- (3) *Concept and assumptions of work, research methodology, research and interpretation of the results*
- (4) *Assumptions of work and research methodology, analysis and interpretation of the results and conclusions*

However, such materials are barely effective as grease due to thermal degradation during sintering of powder details. In this case the technique of pressure impregnation of sintered powder parts appears to be a good solution. Therefore, selection of appropriate lubrication and modification of the surface layer is a very important element. This work presents results of research on a new technology of pressure impregnation. This method is used for modification of slide sleeves. Significant elements of the newly developed technology include parameters of the process conducted and physical properties (type, size, structure, geometry) of impregnated HTSL particles. Modification of the surface layer with the use of the pressure impregnation process of cooperating tribological systems influences the service life of specified friction pairs. The aim of this work was to characterize the pressure impregnation technology and phenomena appearing during infiltration as well as determination of parameters of the pressure impregnation technology.

Keywords: *pressure impregnation, PM, solid greases, porous structure, tribology, nanoparticle*

1. WPROWADZENIE

Wraz z szybkim rozwojem przemysłu i zaawansowanych technologii coraz więcej urządzeń mechanicznych pracuje w trudnych warunkach eksploatacyjnych i przy wysokiej temperaturze (np. w przemyśle lotniczym, elektrycznym – silniki, elementy ślizgowe czy urządzenia mechaniczne w przemyśle jądrowym). Układy z konwencjonalnym systemem smarowania nie spełniają zakładanych wymagań pracy w przypadku wysokich temperatur [1, 2]. W związku z tym istnieje konieczność opracowania materiałów o dobrych właściwościach samosmarujących w warunkach od temperatury pokojowej do temperatury około 1000°C.

W przypadku smarów stałych stosowanych przy wysokiej temperaturze kluczowym działaniem jest rozwój zaawansowanych technologii wytwarzania, kształtowania oraz jego aplikacji w przemyśle. Smary stałe o strukturze nanometrycznej zidentyfikowano jako środki smarujące do wielu zastosowań przemysłowych przy wysokiej temperaturze. Do najwcześniej poznanych i najbardziej popularnych smarów stałych należą grafit i grafenopodobne cząstki smarów stałych takich, jak dwusiarczek molibdenu czy wolframu. Właściwości wspomnianych środków smarnych są efektem dwuwymiarowej budowy o strukturze płytkowej oraz zdolności do tworzenia na powierzchni styku pracujących materiałów warstw granicznych charakteryzujących się niską wartością współczynnika tarcia i dużą odpornością na zużycie.

1. INTRODUCTION

As industry and advanced technologies are developed, more and more mechanical devices operate in harsh operating conditions and in high temperature (e.g. in the aviation and electrical sector – motors, slide elements or mechanical devices in the nuclear energy sector). Systems using conventional lubrication systems do not comply with assumed operating conditions in case of high temperatures [1, 2]. Therefore, it is necessary to develop materials with good self-lubricating properties with their operating conditions ranging from ambient temperature to around 1000°C.

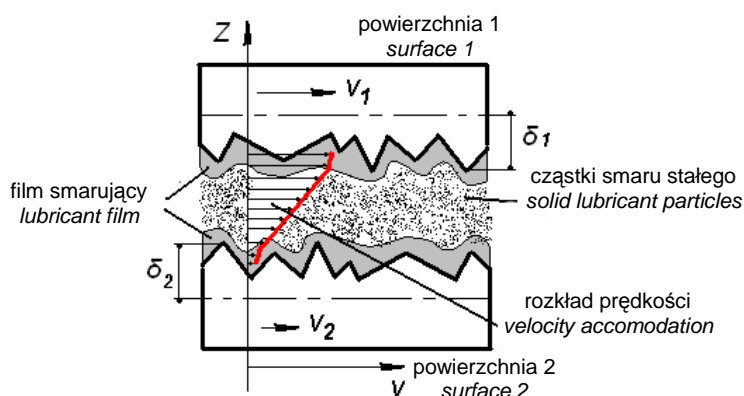
In case of solid greases used for high temperature, a key activity involves development of advanced technologies of production, shaping and application of the same in the industry. Solid greases with nanometric structure are identified as lubricating agents for numerous industrial applications in high temperature conditions. The longest known and most popular solid grease include graphite and graphene-like HTSL particles such as molybdenum and tungsten disulfide. Properties of the above-mentioned lubricating agents are results of two-dimensional lamellar structure and ability to create boundary layers on the contact surface of working materials. Such boundary layers are characterized with a low friction coefficient and high resistance to wear.

Jednocześnie warto podkreślić, że właściwości grafenopodobnych stałych smarów siarczkowych wynikają z mocnych wiązań kowalencyjnych i mało zwartej struktury wewnętrznej (oddziaływanie sił van der Waalsa) [1, 3]. Szczegółowa analiza właściwości mechanicznych w czasie obciążenia i ruchu jest niezbędna do zrozumienia złożonej natury fizycznej analizowanych nanostruktur w procesie tarcia. W przypadku smarów stałych na właściwości tribologiczne mają wpływ takie parametry, jak wielkości, kształt cząstek, wytrzymałość mechaniczna czy podatność na pękanie.

Siła kohezji pomiędzy cząstkami proszku relatywnie zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości. Jeśli siła kohezji jest bardzo wysoka, proszek zachowuje się jak porowaty materiał spiekany. W związku z tym trudno jest stworzyć model opisujący zmienne właściwości w różnych warunkach procesu tarcia przy wysokiej temperaturze. Pomiędzy nośnikiem proszku i cząstkami smaru stałego występują cząstki pośrednie. Obserwuje się rozpad i ruch płaszczyzn poślizgu smarów stałych. Zbiór cząstek pośrednich może się przesuwac i obracać względem siebie. Według koncepcji opracowanej przez M. Codet i Y. Berthier [1] takie cząstki znane są jako „ciała trzecie”. Zachowanie „ciała trzeciego” zależy od typu i rozmiaru cząstek smaru stałego [1, 4]. Na rys. 1 przedstawiono koncepcję dotyczącą „ciała trzeciego” podczas procesu smarowania smarami stałymi.

It is also worth emphasizing that properties of graphene-like sulfide solid greases result from strong covalent bonds and barely compact internal structure (van der Waals' interaction) [1, 3]. A detailed analysis of mechanical properties in the time of load and movement is necessary in order to understand the complex physical character of the analyzed nanostructures in the friction process. In case of solid greases, tribological properties are affected by such parameters as size, shape of particles, mechanical strength or susceptibility to breaking.

The force of cohesion between powder particles increases relatively with increase of density. If the force of cohesion is very strong, the powder behaves like a sintered porous material. Therefore, it is difficult to create a model describing variable properties in various conditions of friction process in high temperature. There are intermediate particles between the powder carrier and HTSL particles. Breakdown and movement of slide surfaces of solid greases can be observed. A collection of intermediate particles can move and rotate in relation to one another. According to the concept developed by M. Codet and Y. Berthier [1], such particles are known as a "third body". The behavior of the "third body" depends on the type and size of HTSL particles [1, 4]. Fig. 1 presents the concept relating to the "third body" during the process of lubrication with the use of solid greases.



Rys. 1. Proszek smaru stałego jako „ciało trzecie”

Fig.1. Powder lubricant as a “third body”

Warstwy cząstek smaru stałego na różnych powierzchniach są nanoszone różnymi technikami osadzania. Jedną z możliwości wytwarzania powłok bezpośrednio z zawiesiny jest filtracja na porowatym podłożu. Jest to metoda szybka i wygodna, w wyniku której uzyskuje się powłoki homogeniczne o kontrolowanej grubości i wysokim stopniu powtarzalności.

W celu zrealizowania warunków smarowania quasi-hydrodynamicznego na powierzchni elementów pracujących (np. łożysk ślizgowych) musi zostać wytworzona warstwa smaru. Impregnacja próżniowa porowatego łożyska ślizgowego nie jest skuteczna w przypadku elementów pracujących przy wysokich temperaturach. Dlatego wymagana jest odpowiednia ilość nano- i mikrocząstek na powierzchni międzyfazowej. Technologia impregnacji ciśnieniowej bazująca na procesie filtracji pozwala rozwijać problem wytwarzania warstw smarujących z proszku smaru stałego [2, 5].

Celem badań było scharakteryzowanie technologii impregnacji ciśnieniowej i zjawisk zachodzących podczas procesu infiltracji oraz określenie parametrów technologii impregnacji ciśnieniowej.

2. APARATURA BADAWCZA I METODYKA BADAŃ

W celu polepszenia właściwości tribologicznych łożysk, do proszków przed procesem spiekania dodaje się smary stałe MoS_2 lub WS_2 . Skuteczność smarów stałych w tym przypadku jest bardzo mała, ze względu na zachodzącą degradację termiczną podczas procesu spiekania. Dlatego zastosowanie nowoczesnej i opracowanej technologii, obejmującej procesy dogęszczania, spiekania, impregnacji ciśnieniowej i suszenia wydaje się bardziej skuteczne. W ramach prowadzonych badań wykorzystano urządzenie do impregnacji ciśnieniowej (PC-2) przedstawione na rys. 2.

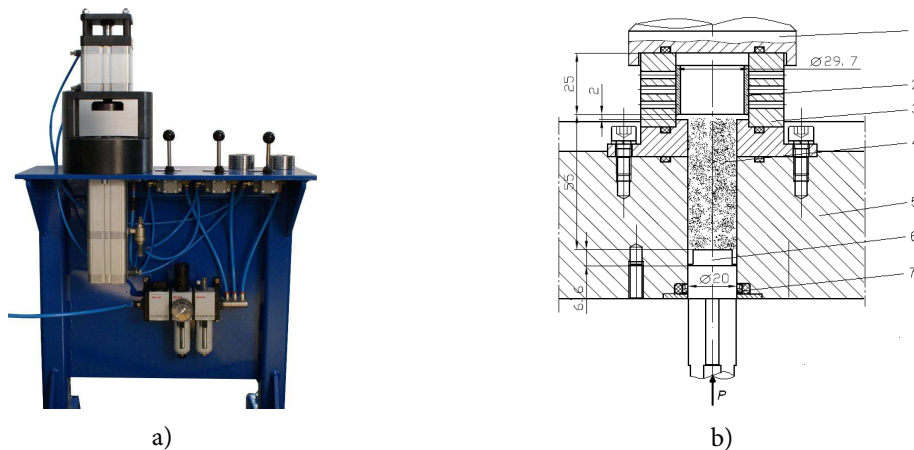
HTSL particles on various coats are applied with the use of various application techniques. One of possible methods of generation of coats directly from a suspension is infiltration on a porous base. This is a quick and convenient method, which results in obtaining of homogeneous coats with controllable density and high degree of repetitiveness.

In order to create conditions of quasi-hydrodynamic lubrication on the surface of working elements (e.g. slide bearings), a grease layer has to be created. Vacuum impregnation of a slide bearing is not effective in case of elements working in high temperatures. Therefore, it takes an appropriate quantity of nanoparticles and microparticles on the interface surface to create such conditions. The pressure impregnation technology based on infiltration process helps to develop the issue of generation of lubricating layers with the use of solid grease powder [2, 5].

The aim of the research was to characterize pressure impregnation technology and phenomena occurring during the infiltration process as well as determine the pressure impregnation technology parameters.

2. RESEARCH EQUIPMENT AND METHODOLOGY

In order to improve tribological properties of bearings, MoS_2 or WS_2 solid greases are added to powders before the sintering process. In this case, solid greases are barely effective due to thermal degradation during the sintering process. Therefore, application of the modern and developed technology covering density increase, sintering, pressure impregnation and drying appears to be more effective. As part of the research, the device for pressure impregnation (PC-2) shown in Fig. 2 was used.



Rys. 2. Urządzenie do impregnacji ciśnieniowej nano/ mikrocząstkami smarów stałych: a) widok ogólny, b) schemat: 1 – stempel górny, 2 – porowata tuleja, 3 – matryca, 4 – zawiesina nano-/mikrocząstek, 5 – płyta dolna z cylindrem, 6 – dolny cylinder, 7 – uszczelnienie tłoka

Fig. 2. Porous sleeve: a) and nano/micro particle pressure impregnation tool, b) 1 – upper punch, 2 – porous sleeve, 3 – matrix, 4 – nano/micro particle suspension, 5 – base plate with bottom cylinder, 6 – bottom cylinder piston, 7 – piston sealing

W przypadku opracowanego procesu impregnacji ciśnieniowej proszków smarów stałych (MoS_2 czy WS_2) rozdrabniano metodą RCT (Rolling Cleavage Technology) [2, 3, 6]. Tak otrzymane cząstki smarów stałych poddano infiltracji porowatych struktur łożysk ślizgowych. W tym przypadku nośnikiem smarów stałych był płyn technologiczny FC111. Zawiesinę smaru stałego i płynu FC111 mieszano przez 1 godzinę. Proces impregnacji zawiesiny nano/mikrocząstek przez porowate ścianki kontrolowany był poprzez pomiar ciśnienia impregnacyjnego, porowatości tulei oraz przepuszczalności porowatej tulei. Podczas procesu impregnacji zastosowano następujące parametry:

- ciśnienie w komorze impregnacyjnej 20–50 MPa,
- stężenie cząstek smarów stałych MoS_2 lub WS_2 w cieczy nośnej – 20%,
- zakres ruchu tłoka – 80 mm,
- objętość zawiesiny nano-/mikrocząstek – 32,7 ml,
- czas impregnacji (infiltracji) – 5 s.

Efektywność procesu impregnacji określono na tulejach o porowatości ~20%. Proces impregnacji przeprowadzono przy różnych wartościach ciśnienia, pozostałe parametry były stałe. Masę zaimpregnowanych smarów stałych wyznaczono po wysuszeniu tulei w temperaturze 150°C w czasie 2 godzin. Grubość powstałej

In the case of the developed process of pressure impregnation, the powder of solid greases (MoS_2 or WS_2) was ground with the use of RCT method (Rolling Cleavage Technology) [2, 3, 6]. Thus obtained solid grease particles were used in to infiltrate the porous structures of slide bearings. In this case, technological fluid FC111 was a carrier of solid greases. The suspension of solid grease and FC111 fluid was stirred for 1 hour. The process of impregnation of the suspension of nano/microparticles by porous walls was controlled by measurement of impregnation pressure, sleeve porosity and permeability of the porous sleeve. During the process of impregnation the following parameters were used:

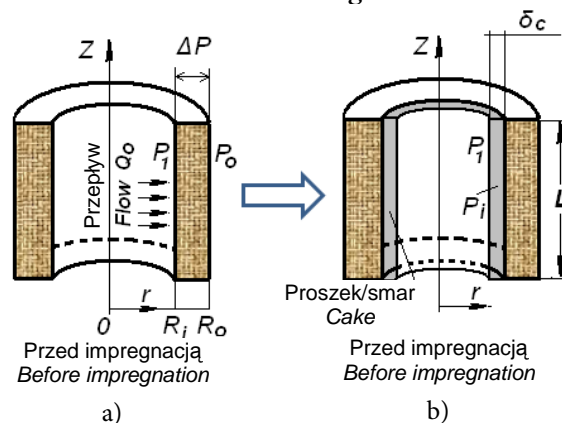
- *pressure in the impregnation chamber: 20–50 MPa,*
- *concentration of MoS_2 or WS_2 solid grease particles in the carrier fluid – 20%,*
- *range of piston movement – 80 mm,*
- *volume of the suspension of nano/microparticles – 32.7 ml,*
- *impregnation (infiltration) time – 5 s.*

The effectiveness of the process of impregnation was determined with the use of sleeves with porosity of ~20%. The process of impregnation was carried out at various pressure values, whereas other parameters were constant. The weight of impregnated solid greases was determined after drying of the sleeve in the

warstwy smaru stałego (filmu smarującego) MoS₂ lub WS₂ określano podczas obserwacji mikrostruktury, prowadzonych z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Mikrostrukturę tulei porowatych analizowano przy użyciu mikroskopu optycznego NICON Elipse 150 L, a porowatość określono, wykorzystując oprogramowanie NIS Elements AR.

3. CHARAKTERYSTYKA PROCESU IMPREGNACJI

Charakterystykę procesu impregnacji można przeprowadzić w oparciu o schemat przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat procesu impregnacji tulei porowatej (kierunek przepływu jest prostopadły do powierzchni); widok tulei przed osadzeniem (a) oraz po procesie impregnacji, gdy nano-/mikrocząstki tworzą film smarujący na wewnętrznej ścianie tulei (b)

Fig. 3. The diagram of the process of impregnation of a porous sleeve (the flow direction is perpendicular to the surface); the view of the sleeve before deposition (a) and after the process of impregnation, when nano/microparticles create a greasing film on the internal wall of the sleeve (b)

Na przedstawionym schemacie proces impregnacji można podzielić na trzy etapy:

1. wypełnianie porowatości otwartych (wnikanie smarów stałych głęboko w pory),
2. zatykanie porów,
3. wzrost warstwy smarów stałych (filmu smarującego).

Na rys. 3 przedstawiono schemat procesu impregnacji porowatej tulei. Na początku procesu impregnacji zawiesina ze smarem wnika prostopadłe przez impregnowaną powierzchnię

temperature of 150°C for 2 hours. The thickness of the resulting MoS₂ or WS₂ solid grease layer (greasing film) was determined during observation of the microstructure with the use of a scanning electron microscope. The microstructure of the porous sleeves was analyzed with the use of NICON Elipse 150 L optical microscope and porosity was determined with the use of NIS Elements AR software.

3. DESCRIPTION OF THE IMPREGNATION PROCESS

The process of impregnation may be described on the basis of the diagram presented in Fig. 3.

As seen on the presented diagram, the process of impregnation may be divided into three stages:

- 1 - filling of open porosities (infiltration of solid grease deep into pores),
- 2 - pore clogging,
- 3 - increase of the solid grease layer (greasing film).

Fig. 3 presents a diagram of the process of impregnation of a porous sleeve. At the beginning of the process of impregnation, the suspension with solid grease passes the sleeve interior

(rys. 3a). Szybkość przepływu ΔP cząstek zmniejsza się po osadzeniu ze względu na opór wytworzonej warstwy filmu smarującego. Określona została masa porowatej tulei przed i po procesie impregnacji oraz po procesie suszenia. Pozwoliło to na określenie ilości zaimpregnowanego smaru stałego.

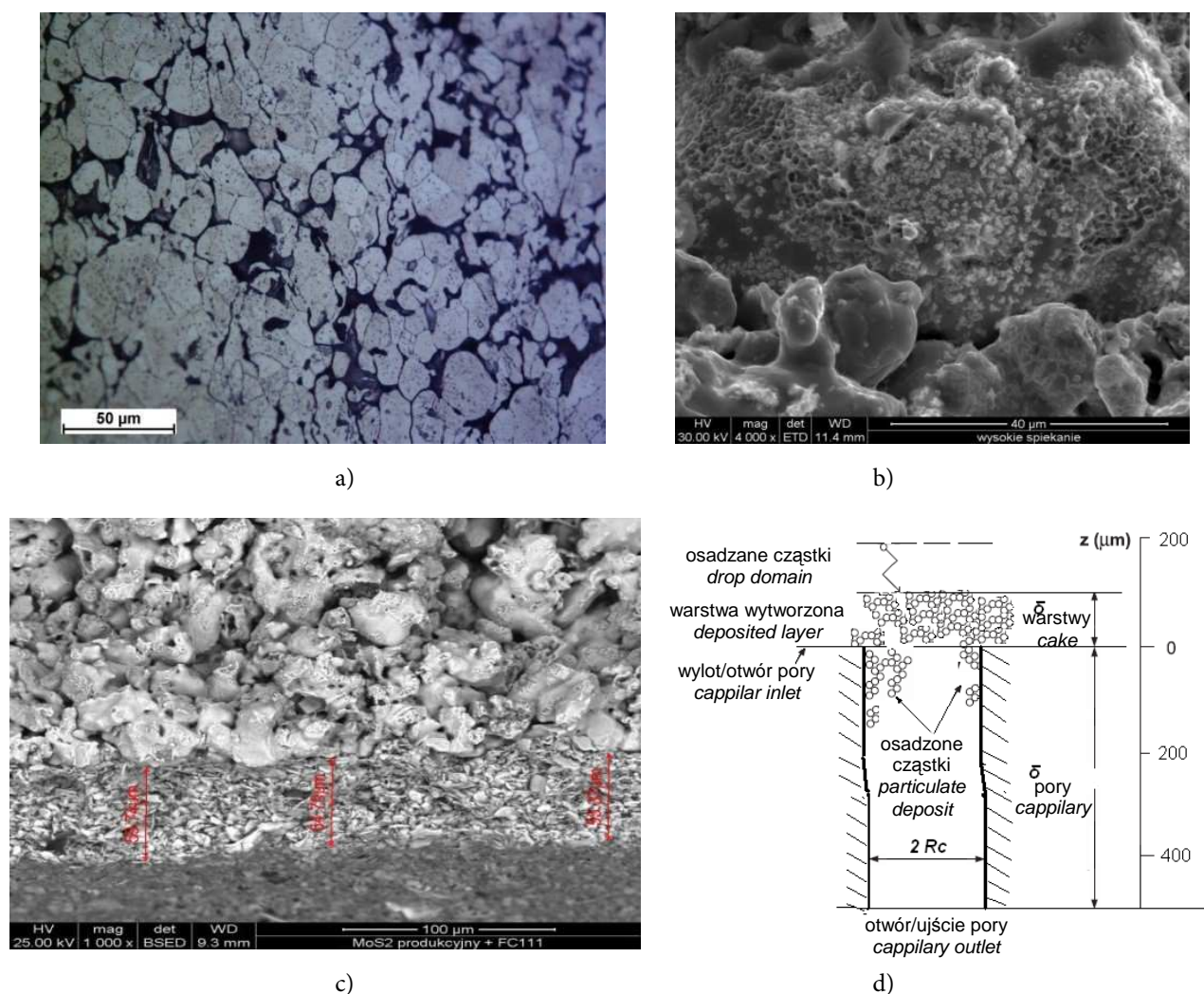
Każdy z etapów procesu impregnacji wpływa na morfologię porowatej struktury tulei. W wyniku procesu impregnacji następuje relatywne zmniejszenie porowatości na skutek zatykania porów przez smar stały i wytworzony film smarujący.

W kanałach porowatej struktury osadzone są cząstki, których prędkość zależy od wartości ciśnienia. W początkowym etapie procesu osadzania zmiany ciśnienia są nieznaczne. Dopiero ze wzrostem ilości zaimpregnowanych cząstek smaru następuje wzrost ciśnienia i dochodzi do zatykania porów. Cząstki smaru gromadzą się w pobliżu wlotu w porach, co powoduje zamykanie się kanałów i porów. Następnie grubość osadzonej warstwy (film smarujący) wzrasta do około 30–90 μm . W przypadku impregnacji kinetyka procesu zależy od przepuszczalności porowatego podłoża. Dla tego przypadku pomiary przepuszczalności przeprowadza się poprzez analizę strumienia w funkcji ciśnienia dla materiału porowatego [4, 7]. W przypadku impregnacji, dla której proces gromadzenia się smaru w porach i kanałach przy zewnętrznej strukturze proces przebiega z większą intensywnością, rezultatem jest szybki proces zatykania się kanałów i porów. W wyniku takiego procesu obniżona zostaje grubość wytworzonej zmodyfikowanej warstwy wierzchniej i filmu smarującego [8, 9]. Stosując model przenoszenia masy, możliwe jest oszacowanie średniej wielkości porów i grubości osadzonej warstwy [10, 11]. Eksperymentalne wyniki badań procesu impregnacji ciśnieniowej przedstawiono na rys. 4.

and infiltrates perpendicularly through the impregnated surface (Fig. 3a). The flow rate ΔP of particles decreases after deposition due to resistance of the created greasing film layer. The weight of the porous sleeve before and after the process of impregnation and drying was determined. This made it possible to determine the volume of the impregnated solid grease.

Each of the stages of the process of impregnation affects the morphology of the sleeve porous structure. As a result of the process of impregnation, porosity decreases relatively as a result of clogging of the pores by solid grease and developed greasing film.

In the porous structure channels, there are particles depositing with the rate depending on the pressure values. At the initial stage of the deposition process, pressure variations are barely noticeable. It is only with the increase of the quantity of impregnated particles of solid grease that the pressure increases and pores become clogged. The grease particles accumulate near the inlet to the pores, which causes the clogging of the channels and pores. Next, the thickness of the deposited layer (greasing film) increases to approx. 30–90 μm . In the case of impregnation, the process kinetics depends on the permeability of the porous base. In this case, permeability measurements are made by analyzing the stream as a function of pressure for the porous material [4, 7]. In the case of impregnation, where the grease accumulates in the pores and channels at the external structure, the process is more intensive. It results in quick channel and pore clogging. The process also results in a decrease of thickness of the created modified surface layer and the greasing film [8, 9]. Using the model of weight transfer it is possible to estimate the average size of pores and thickness of the layer deposited [10, 11]. Experimental results of tests relating to the process of pressure impregnation are presented in Fig. 4.



Rys. 4. Obrazy z mikroskopu optycznego i SEM struktury porowatej: a) obraz optyczny struktury porowatej w przekroju poprzecznym, b) obraz SEM powierzchni tulei nie impregnowanej, c) widok warstwy zmodyfikowanej (impregnowanej) – widok filmu smarującego i zmodyfikowanej struktury porowatej, d) schemat tworzenia się warstwy zmodyfikowanej

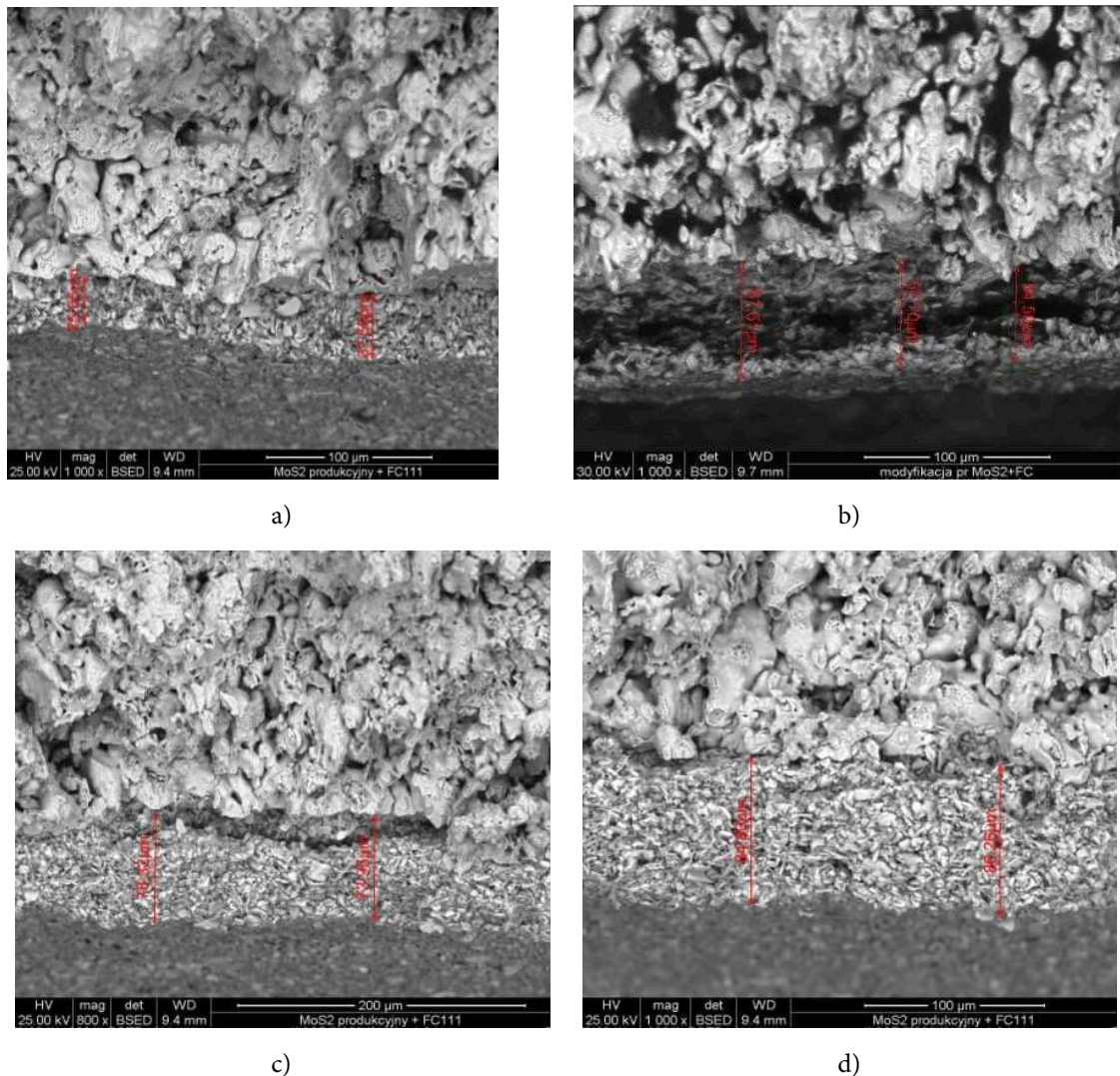
Fig.4. Optical and SEM images of clean porous sleeve. (a) – optical image of the sample cross section; (b) – SEM image of fracture surface of the clean sleeve; (c) - SEM image of the deposited MoS₂ particulate layer on the porous sleeve; and (d) - schematic of particulate layer formation during suspension filtration through the porous channel

4. WYNIKI DOŚWIADCZALNE IMPREGNACJI CIŚNIENIOWEJ

Obrazy uzyskanej porowatej struktury tulei przedstawiono na rys. 5. Tuleja (rys. 5 a i 5b) składa się z dużych cząstek stali odpornej na korozję o średnicy rzędu 100 µm, podczas gdy warstwa impregnacyjna składa się z aglomeratów, zbudowanych z cząstek smarów stałych o średnicy 800 µm i grubości od 10 do 100 nm tworzących strukturę koronkową. Na przekroju poprzecznym mierzono grubość i porowatość tulei.

4. EXPERIMENTAL RESULTS OF PRESSURE IMPREGNATION

Images of the porous structure of the sleeve are presented in Fig. 5. The sleeve (Fig. 5 a and 5b) comprises large particles of corrosion-resistant steel with the diameter of 100 µm, whereas the impregnation layer comprises agglomerates consisting of solid grease particles with the diameter of 800 µm and thickness from 10 to 100 nm creating a lace structure. The thickness and porosity of the sleeve were measured at the cross-section.

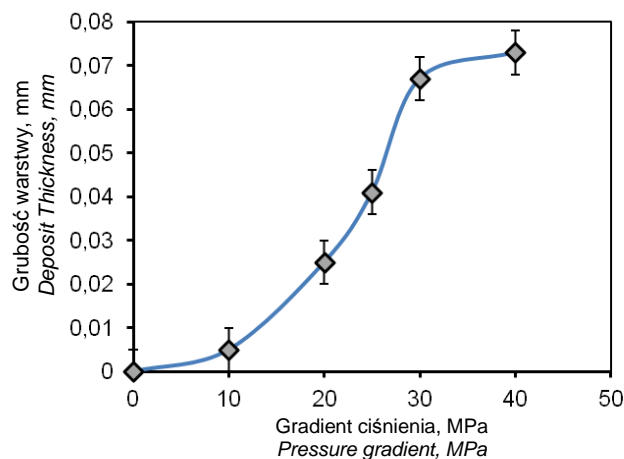


Rys. 5. Obrazy SEM warstwy cząstek zgromadzonych w wyniku impregnacji ciśnieniowej dla ciśnienia:
a) 20 MPa, b) 25 MPa, c) 30 MPa, d) 40 MPa

Fig. 5. SEM images of MoS_2 particulate layer deposited by pressure impregnation/ filtration at pressure gradients 20 MPa (a), 25 MPa (b), 30 MPa (c) and 40 MPa (d)

Wyniki przedstawione na rys. 6 obrazują wpływ wartości ciśnienia na grubość otrzymanej warstwy smaru stałego. W wytworzonej strukturze porowatej zaobserwowano wiele dużych porów (rys. 5). Adhezja smaru stałego do podłoża porowatego była stosunkowo mała, dlatego na przełomach (rys. 5) widoczne są pęknięcia na granicy faz substratu i warstwy. Średnia wartość porowatości smaru stałego wynosi 35–40%. W związku z tym potrzebne było dodatkowe zagęszczenie warstwy smaru dla uzyskania lepszej adhezji i zwiększenia gęstości warstwy.

The results presented in Fig. 6 reflect the influence of pressure values on the thickness of the obtained solid grease layer. A lot of large pores were observed in the porous structure (Fig. 5). Adhesion of solid grease to the porous base was relatively low and, therefore, there are cracks visible at fractures (Fig. 5) at the border of the substrate phase and layer. The average porosity of solid grease is 35–40%. Therefore, it was necessary to increase the density of the grease layer for better adhesion and increase of the layer density.

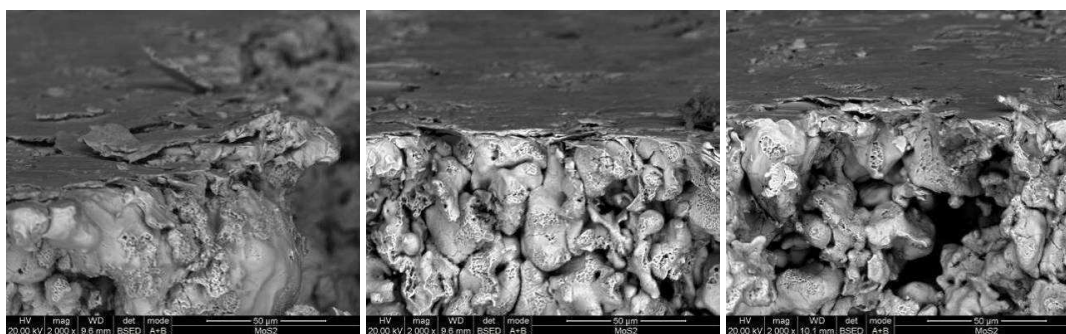


Rys. 6. Zależność grubości filmu smarującego (MoS₂) w funkcji gradientu ciśnienia

Fig. 6. Dependences of MoS₂ layer thickness on pressure gradient ΔP

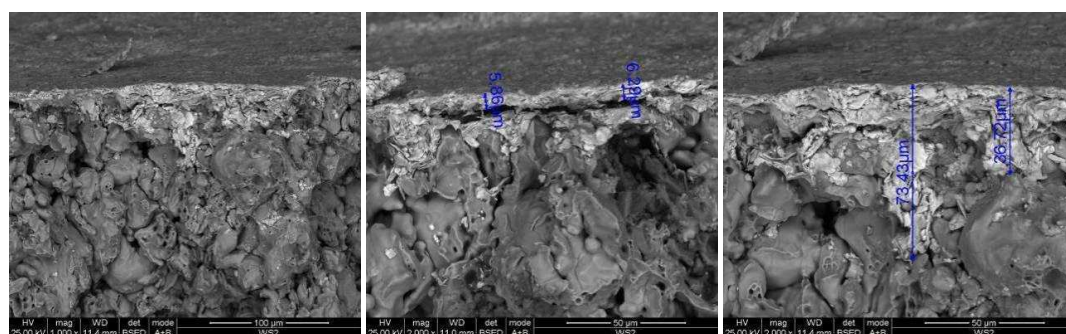
Otrzymane wyniki świadczą o tym, że zmiana wartości ciśnienie impregnacji powoduje zmianę natężenia przepływu przez porowatą matrycę, a w konsekwencji zmianę kinetyki osadzania warstwy wierzchniej. Zwiększenie ciśnienia spowodowało dodatkowe zagęszczanie smaru stałego. Na rys. 7–8 przedstawiono obrazy SEM łożysk ślizgowych impregnowanych ciśnieniowo nano-/mikrocząstkami smarów stałych.

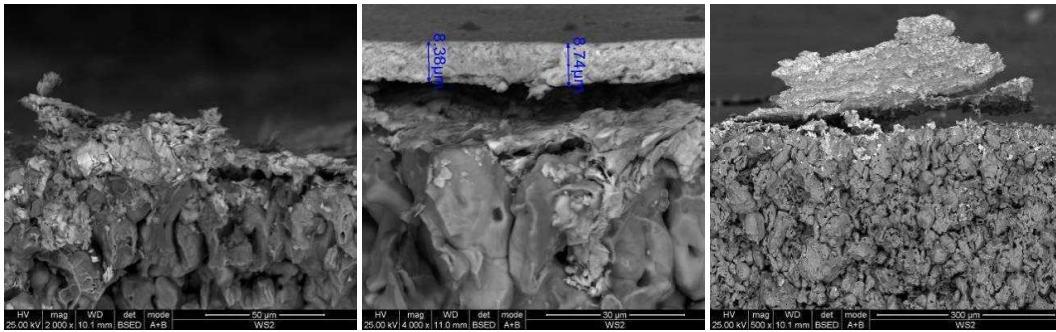
The obtained results prove that a change of values of impregnation pressure changes the intensity of the flow through a porous die and, consequently, changes the kinetics of deposition of the surface layer. The increase of pressure causes the increase of density of the solid grease. Fig. 7–8 presents SEM images of pressure-impregnated slide bearings with the use of nano/microparticles of solid greases.



Rys. 7. Obrazy SEM przelomów impregnowanych łożysk ślizgowych z warstwą smarującą MoS₂

Fig. 7. Fracture topography of the sliding bearings modified with lubricating layer (MoS₂)



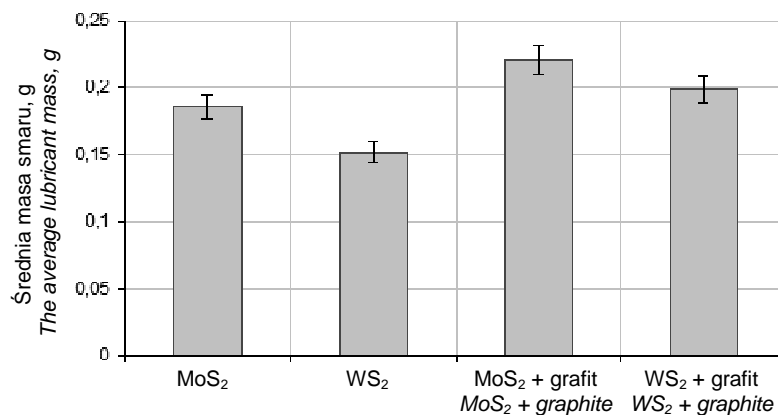


Rys. 8. Obrazy SEM przełomów impregnowanych łożysk ślizgowych z warstwą smarującą

Fig.8. Fracture topography of the sliding bearings modified with lubricating layer WS_2

W ramach badań przeprowadzono także analizę ilościową procesu impregnacji, mającą na celu określenie ilości zaimpregnowanych cząstek smaru stałego w porowatej strukturze części (rys. 9). Na tej podstawie możliwe było określenie ilości cząstek smarów stałych w zmodyfikowanej warstwie wierzchniej. Ważnym elementem w pracy układów tribologicznych jest odpowiednie i stałe dostarczanie smaru do obszaru współpracujących powierzchni określonej pary trącej, co wpłynie na ograniczenie współczynnika tarcia i zużycia współpracujących par tribologicznych.

As part of the research a quantitative analysis of the process of impregnation was also conducted, which aimed at determination of the quantity of impregnated solid grease particles in the porous structure of the part (Fig. 9). This made it possible to determine the quantity of particles of solid greases in the modified surface layer. An important element of operation of tribological systems is appropriate and constant feeding of grease to the areas of cooperating surfaces of a specified friction pair, which will have influence on the limitation of the friction coefficient and wear of cooperating tribological pairs.



Rys. 9. Wartość średnia masy zaimpregnowanych cząstek smarów stałych

Fig. 9. The average lubricant mass value for the solid lubricant particles

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że mieszanina smaru stałego MoS_2 z grafitem i smaru stałego WS_2 z cząstkami grafitu pozwala na lepsze gromadzenie i pokrywanie porowatej struktury niż ma to miejsce dla MoS_2 i WS_2 . Jest to związane ze zmianą przepływu cząstek o różnych wielkościach pod-

On the basis of the obtained research results it can be stated that the mixture of MoS_2 solid grease, graphite and WS_2 solid grease with graphite particles allows better accumulation and coating of the porous structure than it is for the case of MoS_2 and WS_2 . This is connected with a change of the flow of particles of various

czas procesu impregnacji. Dodatek cząstek grafitu o charakterystycznej strukturze warstwowej znacznie ułatwia gromadzenie się smaru na powierzchni współpracującej (tworzenie powłoki – filmu smarującego) i sprzyja gromadzeniu się środka smarującego w rezerwuarach przy powierzchni porowatej. Dzięki temu można wydłużyć żywotność określonych węzłów trących, zmniejszając współczynnik tarcia i zużycia powierzchni trących.

5. PODSUMOWANIE

Technologie impregnacji ciśnieniowej stosuje się w przemyśle do modyfikacji tulei ślizgowych. Nowa technologia impregnacji ciśnieniowej jest przeznaczona dla osadzania mikro i nanocząstek na powierzchniach ślizgowych, w celu osiągnięcia smarowania system quasi-hydrodynamicznego. Przeprowadzone prace pozwoliły wnioskować, że dodatek cząstek grafitu, o strukturze warstwowej znacznie ułatwia gromadzenie się smaru na powierzchni współpracującej (tworzenie powłoki – filmu smarującego) oraz sprzyja gromadzeniu się środka smarującego w rezerwuarach przy powierzchni porowatej. Jednocześnie zaobserwowano wpływ gradientu ciśnienia na masę zaimpregnowanych w porach cząstek smarów stałych. Wraz ze wzrostem ciśnienia impregnacji następuje wzrost grubości modyfikowanej smarem stałym warstwy wierzchniej tulei.

PODZIĘKOWANIA

Realizowana praca i otrzymane wyniki powstały dzięki finansowaniu ze środków siódmego programu ramowego Unii Europejskiej FP7/2007-2013 na podstawie umowy w sprawie przyznania grantu nr 606009, w których zamawiającym są MSP. Praca naukowa dofinansowana ze środków na naukę w latach 2014–2015 przyznanych na realizację współfinansowanego projektu międzynarodowego.

sizes during the period of impregnation. The addition of graphite particles with characteristic lamellar structure considerably facilitates the accumulation of grease on the cooperating surfaces (creating a coat – greasing film) and favors accumulation of the greasing agent in reservoirs at the porous structure. This enables an extension of the service life of friction loops, thus decreasing the friction coefficient and wear of friction surfaces.

5. CONCLUSIONS

Pressure impregnation technologies are used in the industry for modification of slide sleeves. The new technology of pressure impregnation is designed for depositing of microparticles and nanoparticles on slide surfaces in order to obtain greasing of a quasi-dynamic system. Based on the works conducted we can conclude that an addition of graphite particles with lamellar structure considerably facilitates the accumulation of grease on the cooperating surface (creating a coat – greasing film) and favors the accumulation of the greasing agent in reservoirs at the porous structure. The influence of pressure gradient on the weight of solid grease particles impregnated in pores has also been observed. The increase of impregnation pressure leads to the increase of the thickness of the surface layer of the sleeve modified with the use of solid grease.

ACKNOWLEDGMENTS

The work has been carried out and results have been obtained under financing from the 7th EU framework program FP7/2007-2013 under a grant contract No. 606009, where MSP is the procuring party.

The scientific work has been co-financed with the funds for science in the years 2014–2015 granted for realization of a co-financed international program.

LITERATURA

- [1] Berthier Y., Godet M., Brendle M. 1989. „Velocity Accommodation in Friction”. *Tribol. Trans.* 32: 490–496.
- [2] Wiśniewska-Weinert H. 2012. „Kompozyty z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi” *Open Access Library*, 9 (15).
- [3] Wiśniewska-Weinert H. 2013. „Deposition of MoS₂ particulate layers by pressure impregnation of porous sliding bearings”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (2): 255–261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.09.005>.
- [4] Lijewski M., Leshchynsky V., Wiśniewska-Weinert H., Sulej-Chojnacka J. 2014. „Wpływ submikrometrycznych cząstek smarów stałych w warstwie wierzchniej części pracujących w podwyższonych temperaturach na właściwości tribologiczne”, *Tribologia* 3: 119–130.
- [5] Uchytł P. 1996. „Pore-size determination in the separation layer of a ceramic membrane using the permeation method”. *J. Mater. Sci.* 31: 6293–6298.
- [6] Leshchynsky V., Ignatiev M., Wiśniewska-Weinert H., Borowski J., Rybak T., Dobrovnik I. 2010. „Forging tools modification with graphene-like solid lubricant nanoparticles”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 43: 341–348.
- [7] PCT/PL2010/000090 – „Method for manufacturing of nanocomposite graphene-like greases and unit for manufacturing of nanocomposite graphene-like greases” z prawem pierwszeństwa ze zgłoszenia krajowego P.390101.
- [8] Wiśniewski T., Rybak T., Wendland J., Majchrzak W., Leshchynsky V. 2010. „Spiekane tuleje proszkowe samosmarnego łożyska ślizgowego o zmodyfikowanych właściwościach”. *Obróbka Plastyczna Metali* XXI(1): 53–64.
- [9] PCT/PL2010/000091 – „Method for increasing the strength properties of bearing sleeves and unit for increasing the strength properties of bearing sleeves” z prawem pierwszeństwa ze zgłoszenia krajowego P.390100.
- [10] Leshchynsky V., Weinert H., Ingatev M., Kozubowski J.A., Smalc-Koziorowska J. 2008. „Friction and wear with WS₂ nano-particles under mixed and boundary lubrication”. *Obróbka Plastyczna Metali* XIX(1): 29–40.

REFERENCES

- [1] Berthier Y., Godet M., Brendle M. 1989. „Velocity Accommodation in Friction”. *Tribol. Trans.* 32: 490–496.
- [2] Wiśniewska-Weinert H. 2012. „Kompozyty z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi” *Open Access Library*, 9 (15).
- [3] Wiśniewska-Weinert H. 2013. „Deposition of MoS₂ particulate layers by pressure impregnation of porous sliding bearings”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (2): 255–261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.09.005>.
- [4] Lijewski M., Leshchynsky V., Wiśniewska-Weinert H., Sulej-Chojnacka J. 2014. „Wpływ submikrometrycznych cząstek smarów stałych w warstwie wierzchniej części pracujących w podwyższonych temperaturach na właściwości tribologiczne”, *Tribologia* 3: 119–130.
- [5] Uchytł P. 1996. „Pore-size determination in the separation layer of a ceramic membrane using the permeation method”. *J. Mater. Sci.* 31: 6293–6298.
- [6] Leshchynsky V., Ignatiev M., Wiśniewska-Weinert H., Borowski J., Rybak T., Dobrovnik I. 2010. „Forging tools modification with graphene-like solid lubricant nanoparticles”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 43: 341–348.
- [7] PCT/PL2010/000090 – „Method for manufacturing of nanocomposite graphene-like greases and unit for manufacturing of nanocomposite graphene-like greases” z prawem pierwszeństwa ze zgłoszenia krajowego P.390101.
- [8] Wiśniewski T., Rybak T., Wendland J., Majchrzak W., Leshchynsky V. 2010. „Spiekane tuleje proszkowe samosmarnego łożyska ślizgowego o zmodyfikowanych właściwościach”. *Obróbka Plastyczna Metali* XXI(1): 53–64.
- [9] PCT/PL2010/000091 – „Method for increasing the strength properties of bearing sleeves and unit for increasing the strength properties of bearing sleeves” z prawem pierwszeństwa ze zgłoszenia krajowego P.390100.
- [10] Leshchynsky V., Weinert H., Ingatev M., Kozubowski J.A., Smalc-Koziorowska J. 2008. „Friction and wear with WS₂ nano-particles under mixed and boundary lubrication”. *Obróbka Plastyczna Metali* XIX(1): 29–40.

